Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Investigating the Impact of HK Friction Model Input Parameters on the Force and Critical Time in Gold Nanoparticle Manipulation

Research Article

Moein Taheri[1], Hamed Faraji[2],

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80792.1160

1. Introduction

Atomic force microscopy tools are used to manipulate nanoparticles, measure the mechanical properties of objects, and image nanoscale surfaces. Due to the increased surface area-to-volume ratio in the nanoworld, various friction models have been presented in the process of nanomanipulation to describe the real motion conditions in the nanoworld to the macro world. Critical forces and times for various nanoparticle manipulations must be calculated so as not to damage the nanoparticles under study, especially bioparticles. An excessive increase in the critical force causes severe damage to the target nanoparticles. Calculating the critical time accurately is important as the particles stick to the basal plane and are not manipulated before the critical time is reached, and the manipulation of the particles occurs after the critical time. If the critical time calculation is incorrect, the particles will not reach or pass the target point. According to the research done in the past, one can say that different friction models, including HK friction model, have been used to simulate the manipulation of different nanoparticles to achieve critical force and time. The innovation of the research compared to other studies lies in the investigation of the impact of the input parameters of HK friction model on the reduction of the critical force and the increase of the critical time in moving gold nanoparticles.

2. HK friction model

In general, different friction models such as Coulomb and HK are defined for different situations. In this study, the HK friction model was preferred because it closely resembles Coulomb model. Moreover, this model is even more accurate than Coulomb model at the nanoscale. According to Figure 1, Hurtado and Kim present a micromechanical displacement model of frictional sliding between two protrusions and state that if the contact radius is smaller than a critical value, the frictional stress remains constant. Beyond this critical value, the frictional stress decreases with increasing contact radius until a quadratic transition occurs.

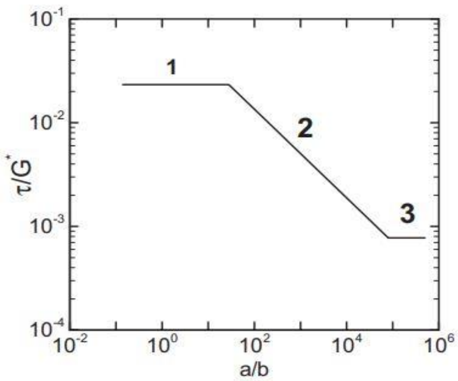


Figure 1. The relation between dimensionless friction stress and dimensionless contact radius in HK friction model

3. Experiment design by Taguchi method

Experiments are designed to achieve the optimal number of experiments with the aim of saving money and time. Among the design of experiments, Taguchi method and the response surface method can be mentioned. Parameter level design determines the best performance of the product or process in quetion. In this method, the loss function can effectively improve the effectiveness of the process and achieve a high quality process from the point of view of parameter design. In this study, Taguchi method experiment design and input parameter optimization of HK model manipulating gold nanoparticles were performed using Minitab software version 21.1 to optimize the number of tests.

4. Results

Analysis can be performed using two analysis methods, variance and signal-to-noise ratio analysis, to identify optimal values for effective parameters and levels. Data analysis for this study was done using the signal-to-noise method. In this section, the impacts of the input

*Manuscript received: January 25, 2023. Revised, February 8, 2023, Accepted, April 5, 2023.

[1]. Corresponding author, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. **Email**: m-taheri@araku.ac.ir

[2] M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran..

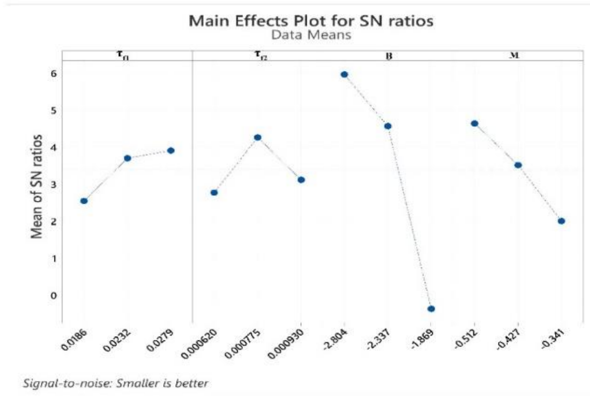
parameters, $\bar{\tau}_{f_1}$, $\bar{\tau}_{f_2}$, B and M of HK model on the output force and critical time characteristics are thoroughly investigated using Taguchi signal-to-noise diagrams.
In Taguchi method, the signal-to-noise ratio is used in order to determine the levels of tests assuming the highest or lowest performance for the test variables. The loss function for the critical force is chosen as the less the better and is calculated as the logarithmic transformation of the loss function according to Equation 1:

$$\eta_{ij} = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (1)$$

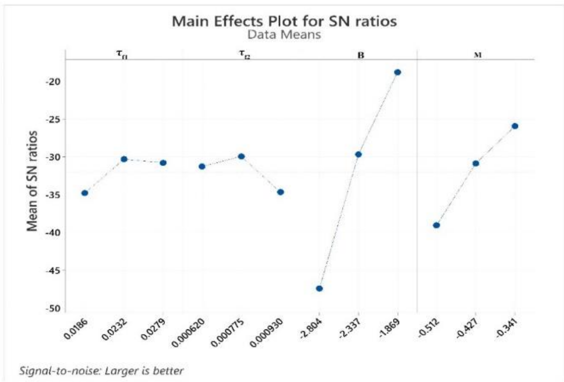
One of the parameters that affects the critical force reduction in HK model of nanoparticle manipulation is parameter B. According to Figure 2, Level 3, followed by Level 2, had the greatest impact on critical force reduction. It can also be seen that the critical force decreases significantly as the value of parameter B increases. Depending on the reduction slope and the required level, it can be ssen that the value of this parameter at Level 3 is the most effective factor in reducing the critical force.
One of the effective parameters on increasing the critical time in HK model for manipulation nanoparticles is parameter B. According to Figure 2-B, Level 3 and then Level 2 have the greatest impact on increasing the critical time. Increasing the value of parameter B causes a significant increase in the critical time. According to the slope of the graph and the available levels, it is concluded that the value of this parameter at level 3 is the most effective factor on the critical time.

5. Conclusion

The manipulation of gold nanoparticles based on atomic force microscopy using HK friction model based on real contact surfaces was investigated. To move, gold particles with a radius (Rp) of 50 nm were propelled at a constant velocity onto a silicon oxide substrate. The main purpose of this work was to study the impacts of the input parameters of HK friction model on the critical force reduction and critical time increase when manipulating gold nanoparticles. To achieve optimal levels for each input parameter of HK friction model, Taguchi test design method was used and the signal-to-noise method was used to analyze the results. The following results were observed for critical force: The first effective parameter on reducing the critical force is parameter B. Level 3 with a value of -1.869 and then level 2 with a value of 2.337 had the greatest impact on reducing the critical force.
The impact of input parameters on increasing critical time results in: Parameter B is the most effective input parameter for increasing the critical time in HKA friction model. Level 3 with a number of -1.869, followed by Level 2 with a number of -2.337, had the greatest impact on increasing critical time. The second valid parameter for increasing the critical time is the level 3 M parameter, which has a numerical value of -0.341.



A. Critical force



B. Critical time

Figure 2. Influence diagram of the studied parameters on force and critical time

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی اچ‌کا بر نیرو و زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا*

مقاله پژوهشی

معین طاهری[(۱)] حامد فرجی[(۲)]

DOI: 10.22067/jacsm.2023.80792.1160

چکیده *در مقیاس ماکرو نیروهای سطحی مانند اصطکاک و چسبندگی اهمیت کمی دارند و می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد، اما در دنیای میکرو/نانو، این نیروها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. بدین منظور، جهت شبیه‌سازی جابه‌جایی نانوذرات مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی، می‌توان از مدل‌های اصطکاکی مختلفی از جمله مدل اصطکاکی اچ‌کا استفاده کرد. محاسبه دقیق نیرو و زمان بحرانی به‌ترتیب به‌منظور صدمه نزدن به ذره و رسیدن ذره به نقطه هدف در فرایند جابه‌جایی امری مهم و ضروری می‌باشد. در این تحقیق، داده‌ها با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در سه سطح جمع‌آوری شدند. مقدار نیرو و زمان بحرانی برای هر آزمایش محاسبه شد، سپس با کمک تجزیه‌وتحلیل به روش نسبت سیگنال به نویز به بررسی اثر پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی اچ‌کا شامل، $\bar{\tau}_{f_1}$، $\bar{\tau}_{f_2}$، B و M بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا با شعاع ۵۰ نانومتر موجود بر روی بستر اکسید سیلیکون پرداخته شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، پارامتر B به‌عنوان اولین پارامتر و M به‌عنوان دومین پارامتر اثرگذار با پایین‌ترین نسبت سیگنال به نویز بر کاهش نیروی بحرانی و با بالاترین نسبت سیگنال به نویز برزمان بحرانی در سطح ۳ به ترتیب با مقادیر ۱/۸۶۹- و ۰/۳۴۱۹- می‌باشند.*

واژه‌های کلیدی نانوذره طلا، مدل اصطکاکی اچ‌کا، جابه‌جایی نانوذره، نیروی و زمان بحرانی، میکروسکوپ نیروی اتمی.

Investigating the Effect of HK Friction Model Input Parameters on the Force and Critical Time in Gold Nanoparticle Manipulation

Moein Taheri Hamed Faraji

Abstract *In the macro scale, surface forces such as friction and adhesion are of little importance and can be ignored. But in the micro/nano world, these forces are of great importance. For this purpose, in order to simulate the manipulation of nanoparticles based on the atomic force microscope, various friction models can be used, including the HK friction model. Accurate calculation of force and critical time, respectively, in order not to damage the particle and to reach the target point in the manipulation process is important and necessary. In this research, data were collected using the Taguchi test design method in three levels. The amount of force and critical time were calculated for each test. Then, with the help of analysis using the signal-to-noise ratio method, to investigate the effect of the input parameters of the HK friction model including, $\bar{\tau}_{f_1}$, $\bar{\tau}_{f_2}$,B and M The reduction of the critical force and the increase of the critical time in mamipulation the gold nanoparticle with a radius of 50 nm on the silicon oxide substrate have been discussed. Based on the obtained results, parameter B as the first parameter and M as the second parameter with the lowest signal-to-noise ratio on reducing the critical force and with the highest signal-to-noise ratio at the critical time at level 3 with values of -1.869 and -0.3419.*

Key Words Gold nanoparticles, HK Friction model, Nanomanipulation, Critical force and time, Atomic Force Microscopy.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۰۱/۱۶ می‌باشد.

(۱) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.

Email: m-taheri@araku.ac.ir

مقدمه

ابزار میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic force microscopy) به‌منظور جابه‌جایی نانوذرات (nanomanipulation)، اندازه‌گیری خواص مکانیکی اجسام و تصویربرداری سطوح با مقیاس نانو به کار می‌رود، که یکی از مهم‌ترین بخش‌های نانو فناوری می‌باشد. در فرایند جابه‌جایی نانوذرات مدل‌های اصطکاکی مختلفی به‌منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی حرکت در دنیای نانو است، زیرا در دنیای نانو نسبت سطح به حجم افزایش یافته و به همین دلیل، نیروهای سطحی مانند نیروی چسبندگی و اصطکاک نسبت به دنیای ماکرو از اهمیت بیشتری برخوردارند. محاسبه نیرو و زمان بحرانی جابه‌جایی نانوذرات مختلف به‌منظور عدم آسیب‌رسانی به نانوذرات مورد مطالعه، امری ضروری می‌باشد، به‌خصوص در ذرات بیولوژیکی افزایش بیش از حد نیرو بحرانی سبب آسیب‌رسانی جدی به نانوذره هدف می‌شود. اهمیت محاسبه دقیق زمان بحرانی به این دلیل است که، ذره تا قبل از رسیدن به زمان بحرانی به صفحه مبنا چسبیده و هیچ حرکتی نداشته و جابه‌جایی ذره پس از زمان بحرانی رخ خواهد داد. اگر محاسبه زمان بحرانی صحیح نباشد ذره به نقطه هدف نخواهد رسید و یا از آن نقطه عبور خواهد کرد.

بنابراین تحقیقات مختلفی توسط محققان در سراسر جهان در رابطه با فرایند جابه‌جایی نانوذرات به‌منظور محاسبه نیرو و زمان بحرانی دقیق با استفاده از تئوری‌های تماسی و اصطکاکی مختلفی ارائه شده است.

ذاکری و خوارزمی [1] به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی سطح، با توزیع زبری تصادفی پرداخته‌اند. پارامترها شامل انحراف معیار، ارتفاع زبری‌ها و شعاع نوک قله زبری‌ها بر روی نیروی عمودی و نیروی اصطکاک بوده‌اند. آن‌ها، ابتدا مدل اصطکاکی توسعه یافته AMM را برای تماس سطوح تخت صاف/تخت زبر، بر اساس مدل تماسی جی‌کاآر، مدل اصطکاکی HK و توزیع زبری تصادفی گرین وود–ویلیامسون یا Gw استخراج کرده‌اند. طبق نتایج شبیه‌سازی، مدل اصطکاکی توسعه‌یافته AMM با در نظر گرفتن نیروهای سطحی مقیاس نانو، نیروی اصطکاکی بزرگ‌تری را در مقایسه با مدل اولیه AMM پیش‌بینی کرده است. همچنین، مدل به‌دست آمده، برای تعیین اصطکاک بین سطح کروی صاف/تخت زبر و نهایتا اصطکاک نوک سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی روی سطح زبر تعمیم داده شده است.

کورایم و همکاران [2] به شناسایی خواص مکانیکی سلول‌های سرطانی پرداخته‌اند. همچنین مدل‌های تماسی مناسب برای تعیین مدول الاستیسیته سلول‌های سرطانی SW48 بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی شناسایی و مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از روش سوبل برای تحلیل حساسیت مدل‌های هرتز (Hertz)، لوندبرگ (Lundberg)، داوسون (Dawson)، نیکپور (Nikpour) و هوپریچ (Hoeprich) استفاده شده است. از نتایج حاصل مشاهده شده است که، می‌توان از تئوری‌های لوندبرگ و هرتز برای شناسایی مدول الاستیسیته و از مدل تماسی هوپریچ برای تعیین نسبت پواسون استفاده کرد. در نهایت با استفاده از نتایج به‌دست آمده از تجزیه‌وتحلیل، مدول الاستیسیته سلول سرطانی SW48 به‌صورت تجربی و بر اساس تئوری‌های لوندبرگ و هرتز محاسبه شده است.

کورایم و خاکسار [3] به بررسی تأثیر تئوری ضربه بر مدل‌سازی دینامیکی و شبیه‌سازی نانوذرات مکعبی و بیضوی در فرایند جابه‌جایی بر اساس میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. ابتدا معادلات دینامیکی قبل از حرکت ارائه شده است، سپس با توجه به این معادلات دو فرض برای حرکت نانوذرات در نظر گرفته شده است. با استفاده از تئوری‌های هرتز، JRK و جماری و همچنین رابطه تقریبی ضربه هانتر، اثرات ضربه در حرکت نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که، پس از ۳ ثانیه و تحت نیروهای ثابت، خطی، مرتبه دوم و سینوسی، نانوذره بیضوی به ترتیب کمتر از ۰/۰۸ میکرومتر، ۰/۱۱۴۳ میکرومتر، ۰/۳۶ میکرومتر و ۲۵ نانومتر حرکت می‌کند. علاوه بر این، نتایج حاصل از جابه‌جایی نانوذرات مکعبی نشان داده است که، نانوذرات مکعبی کمتر از ۰/۰۸ میکرومتر، در ۳ ثانیه تحت نیروی ثابت حرکت می‌کنند.

کورایم و همکاران [4] به مطالعه مکانیک تماس نانوذرات کروی در طی فرایند نانو جابه‌جایی پرداخته‌اند. نظریه تماسی هرتز برای نانوذرات کروی ساده در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داده‌اند که، در نظر گرفتن ضربه قبل از تماس، در بهبود پارامترهای تماس اساسی و شناسایی خواص مکانیکی نانوذرات بسیار مؤثر بوده است.

ولاسوف و همکاران [5] نانو جابه‌جایی در زمان واقعی ذرات طلا را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها نیروی مورد نیاز برای جابه‌جایی نانوذرات

کروی طلا ۱۵۰ نانومتر، بر روی یک بستر سیلیکونی محاسبه کرده‌اند. ضریب اصطکاک استاتیکی به‌دست آمده در محدوده ده تا چند صد نانو نیوتن بود است. بر این اساس، نه‌تنها نمودار نیرو – زمان در فاز اول (نقطه بحرانی) ارائه‌شده است، بلکه نمودار نیرو پس از زمان حرکت نیز به‌دست‌آمده است.

مورنو و همکاران [6] از جابه‌جایی مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی برای ساخت مدارهای الکتریکی استفاده کرده‌اند. در این تحقیق از نانوذرات طلا استفاده شده است. مدارهای ساخته شده توسط این گروه به‌راحتی قابل تنظیم مجدد بوده و ساخت آن‌ها نیازی به استفاده از پلیمرها و مواد شیمیایی نداشته است.

طاهری و بطحائی [7] به بررسی فاز اول جابه‌جایی نانوذرات پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از آنالیز حساسیت ای–فست و مدل دقیق اصطکاکی اچ‌کا به بررسی تأثیر پارامترهای محیطی بر نیرو و زمان بحرانی غلتش پرداخته‌اند. انرژی سطحی، کار چسبندگی، مدول الاستیسیته سوزن، مدول الاستیسیته ذره، ضریب پواسون سوزن و ضریب پواسون ذره پارامترهای محیطی موردبررسی بوده‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده، مشاهده شده است که، اثرگذارترین پارامتر روی نیرو و زمان بحرانی غلتش در راستای محور y در جابه‌جایی نانوذرات با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا بوده است.

طاهری [8] به اســـتخراج نیرو و زمان بحرانی جابه‌جایی دوبعدی بافت سرطانی معده با ا ستفاده از میکرو سکوپ نیروی اتمی پرداخته اســت. مدل‌های مختلف اصــطکاکی از جمله مدل اصطکاکی کولمب، لاگره و اچ‌کا مورد مطالعه قرار گرفته است.

محمدی و همکاران [9] به مدل‌ســازی جابه‌جایی نمونه‌های زیستی پرداخته‌اند. شرایط بحرانی لغزش، از جمله، نیرو و زمان بحرانی به‌دست آمده‌اند. در نهایت به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج به‌دست آمده، با پژوهش‌های گذشته برای ذرات طلا و دی‌ان‌ای مقایسه شده است.

طاهری [10] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک سه‌بعدی نانو جابه‌جایی برای ذره طلا جهت نزدیک شدن هر چه بیشتر نتایج مدل‌سازی به نتایج حاصل از نانو جابه‌جایی واقعی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا پرداخته است. نتایج به‌دست آمده، بیانگر شروع به حرکت غلتشی ذره مورد بررسی حول محور x قبل از غلتش حول محور y و همچنین لغزش در راستای محور y قبل از لغزش در راستای محور x بوده است.

کورایم و همکاران [11] به بررسی زبری سطح سلول سرطانی HT29 با استفاده از تحلیل تصاویر توپوگرافی به‌دست‌آمده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی پرداخته‌اند. همچنین با استفاده از نتایج آنالیز زبری انجام‌شده و معادلات تئوری زبری رابینوویچ، شعاع متوسط برجستگی‌های سطح نمونه و سطح‌مبنا محاسبه‌شده است. در نتیجه این پژوهش، مد غلتشی مد غالب در شروع به حرکت سلول است و تحلیل برمبنای مدل رابینوویچ نسبت به مدل رامپ مقادیر نیرو و زمان بحرانی کمتری را پیش‌بینی می‌کند.

اصفهانی و همکاران [12] در پی اختلالات هیدرودینامیکی در محیط زیرآب، به طراحی یک کنترل‌کننده دقیق و قوی در کنترل جابه‌جا کننده زیرآب پرداخته‌اند. در این کنترل‌کننده پیشنهادی ویژگی استحکام (SMC) و پاسخ سریع (PID) با قوانین فازی برای کاهش ردیابی خطا گنجانده شده است. در قانون کنترل برای حذف چتر از تابع‌نمایی استفاده شده است. همچنین سیستم از نظر پایداری با روش مستقیم لیاپانوف تحلیل شده است. از این رو مطالعات مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای یک جابه‌جا کننده زیر آب به‌منظور تأیید اثربخشی روش پیشنهادی در حضور اختلالات دینامیکی مدل نشده (جرم‌های متغیر پیوندها) و اختلال خارجی انجام شده است. هر دو کنترل‌کننده پیشنهادی جدید و SMC معمولی شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی عملکرد بالای کنترل‌کننده پیشنهادی را در مقایسه با SMC معمولی نشان داد.

ذاکری و فرجی [13] به شبیه‌سازی و مدل‌سازی رفتار دینامیکی نانوذره بر روی سطح زبر در حین راندن بر پایه میکروسکوپ نیروی اتمی، با استفاده از مدل تماس چندنقطه‌ای پرداخته‌اند. یک مدل تماسی چندنقطه‌ای برای دو سطح با هندسه زبری متفاوت شامل پروفیل زبری شش‌وجهی و چهاروجهی، از ترکیب مدل تماس تک نقطه‌ای رامپ با مدل تماسی جی‌کاآر و شوارتز استخراج گردید و معادلات مربوط به سطح تماس واقعی و نیروی چسبندگی برای تماس چندنقطه‌ای سطوح زبر ارائه شد سپس رفتار دینامیکی نانوذره کروی در راندن روی سطح زبر، با استفاده از مدل تماس چندنقطه‌ای جدید مدل‌سازی شد. به‌علاوه شبیه‌سازی دینامیکی نانوذراتی با شعاع‌های ۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ نانومتر در جابه‌جایی بر روی سطوح زبر مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل خصوصا در شعاع‌های زبری کوچک، تأثیر عمده‌ای در تعیین نیروی بحرانی حرکت دارد.

حیدری و همکاران [14] به بررسی تأثیر رسوب طلا و تیتانیوم بر روی نوک‌های میکروسکوپ نیروی اتمی در نیروهای چسبندگی و مدول یانگ، بین چند لایه سیلیکون، طلا و نقره

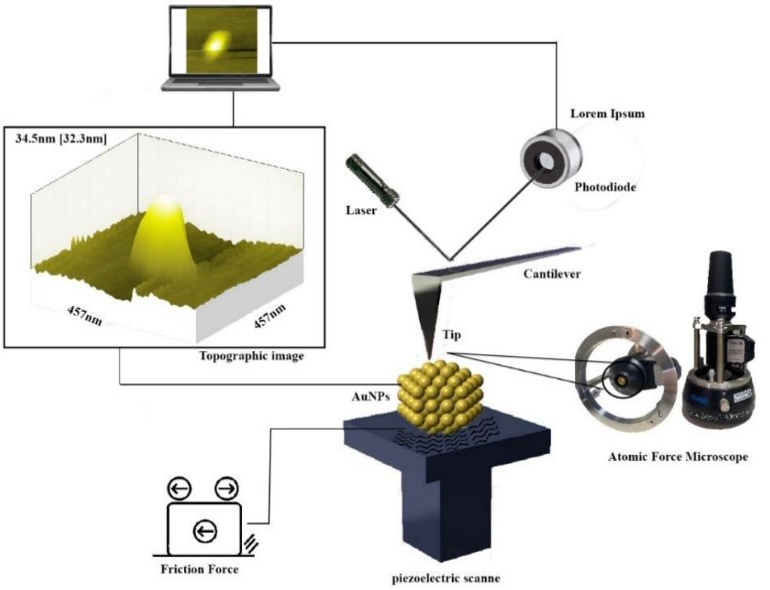
پرداخته‌اند. مشخص شد که به‌جز زیرلایه طلا، یک نوک میکروسکوپ نیروی اتمی پوشش داده شده با طلا دارای بالاترین نیروی چسبندگی با مقدار ۴۲/۶۷ نانونیوتن برای زیر لایه‌های سیلیکونی است، در حالی که نوک میکروسکوپ نیروی اتمی با پوشش تیتانیوم نیرو را برای همه نمونه‌ها کاهش می‌دهد. همچنین این مطالعه نشان داد که چنین تغییراتی باید در هنگام مطالعه نیروی چسبندگی در نظر گرفته شود. نتایج نهایی نشان داد که استفاده از زیرلایه طلا با نوک میکروسکوپ از جنس تیتانیوم منجر به کم‌ترین نیروی چسبندگی می‌شود که می‌تواند در اندازه‌گیری نیروی چسبندگی در حین ریز مونتاژ مفید باشد.

در این پژوهش جابه‌جایی نانوذره طلا (Gold nanoparticles) مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا (HK friction model) که بر اساس سطح تماس واقعی است، مورد بررسی قرارگرفته شده است. به‌منظور جابه‌جایی، یک‌ذره طلا به شعاع (Rp) ۵۰ نانومتر، بر روی بستر اکسید سیلیکون که با سرعت ثابت حرکت می‌کند، رانده شده است. باتوجه به پژوهش‌های انجام شده در گذشته می‌توان مشاهده کرد که از مدل‌های مختلف اصطکاکی از جمله مدل اصطکاکی اچ‌کا به‌منظور شبیه‌سازی جابه‌جایی نانوذرات مختلف برای دستیابی به نیرو و زمان بحرانی استفاده شده است. نوآوری پژوهش صورت گرفته نسبت به دیگر پژوهش‌ها بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی اچ کا بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جا به جایی نانوذره طلا می‌باشد.

پارامترهای $\bar{\tau}_{f_1}$، $\bar{\tau}_{f_2}$، B و M از جمله پارامترهای ورودی تحت بررسی در این پژوهش بودند. بدین منظور جهت دستیابی به سطوح بهینه برای هر یک از پارامترهای ورودی برای مدل اصطکاکی اچ‌کا از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد و به‌منظور تجزیه‌وتحلیل نتایج، روش سیگنال به نویز به‌کار گرفته شد.

مدل‌سازی

در سال‌های اخیر، میکرو سکوپ نیروی اتمی به‌عنوان یک ابزار اساسی برای جابه‌جایی، ساخت و مونتاژ نانوذرات مختلف مانند طلا، دی‌ان‌ای و مخمر، به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. مدل‌سازی جابه‌جایی نانوذرات، ابزاری اساسی برای انجام یک جابه‌جایی دقیق و کنترل شده ذرات در مقیاس میکرو/نانو است. انتقال از دنیای ماکرو به دنیای نانو منجر به افزایش نسبت مساحت به حجم و در نتیجه نیروهای سطحی مانند چسبندگی و اصطکاک می‌شود؛ بنابراین، مدل‌سازی جابه‌جایی و اصطکاک اساسا به هم وابسته هستند. در واقع موفقیت مدل‌سازی جابه‌جایی در پیش‌بینی نتایج تجربی بسیار به‌دقت مدل اصطکاک مرتبط است. در این پژوهش فرایند کلی انجام شده مطابق شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱ چکیده گرافیکی پژوهش

مدل اصطکاکی اچ‌کا

به‌طور کلی مدل‌های ا صطکاک مختلفی از جمله کولمب و اچ‌کا برای موقعیت‌های مختلف تعریف شـده اسـت. در این پژوهش ترجیح داده شد که از مدل اصطکاکی اچ‌کا استفاده شود، زیرا به مدل کولمب شباهت زیادی دارد علاوه بر این، این مدل حتی از مدل کولمب در مقیاس نانو نیز دقیق‌تر ا ست. مطابق شکل (۲) مشـــاهده شـــد که هرتادو و کیم یک مدل جابه‌جایی میکرو مکانیکی از لغزش اصـــطکاکی بین دو برآمدگی ارائه کردند که بیان می‌کند برای شعاع‌های تما سی کوچک‌تر از مقدار بحرانی، تنش اصـــطکاک ثابت می‌ماند. بالاتر از این مقدار بحرانی، تنش اصـــطکاک با افزایش شـــعاع تماس تا زمانی که انتقال ثانویه رخ دهد کاهش می‌یابد. در این شکل ناحیه ۱ لغزش‌های هم‌زمان را با مقادیر آزمایشـی به‌دسـت آمده توسـط میکروسـکوپ نیروی اتمی نشـــان می‌دهد، در حالی که ناحیه ۳ لغزش‌های چندین جابه‌جایی را با مقادیر تجربی به‌دســت آمده توســط تجهیزات آزمایشگاهی SFA نشان می‌دهد. این دو ناحیه توسط ناحیه ۲ به هم متصل می‌شوند که نشان دهنده کاهش تنش برشی با افزایش شعاع تماسی است.

معادله (۱) ن‌شان می‌دهد که نیروی ا صطکاک f_T متنا سب با مجموع نیروی عمودی f_N و نیروی چسـبندگی f_0 اسـت و هیچ واب‌ستگی به سطح تماس ظاهری اج‌سام ماکرو سکوپی وجود ندارد [15].

$$f_T = \mu(f_N + f_0) \tag{۱}$$

همچنین، برای یک ریز تماس، نیروی اصـطکاک به‌صـورت معادله (۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$f_T = \tau A \tag{۲}$$

که در آن A، ناحیه ریز تماس واقعی و τ ، مقاومت برشـــی ا ست. هر دوی این پارامترها مربوط به نیروی عمودی می‌با شند. مقدار مدول بر شی مؤثر دو ج‌سم که در تماس باهم ه‌ستند، از رابطه (۳) به دست می‌آید [16].

$$G^* = \frac{2.G_1.G_2}{(G_1 + G_2)} \tag{۳}$$

رابطه بین تنش اصطکاکی بدون بعد $\bar{\tau}_f = \frac{\tau_f}{G^*}$ و شعاع تماس بدون بعد $\bar{a} = \frac{a}{b}$ در معادلات (۶-۴) نشان داده شده است [17]؛ که در آن a شعاع تماس، b طول بردار برگر و G^* مدول بر شی مؤثر است.

$$\log \bar{\tau}_f = \begin{Bmatrix} \log \bar{\tau}_f, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ M \log \bar{a} + B, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \log \bar{\tau}_{f_2}, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{Bmatrix} \tag{۴}$$

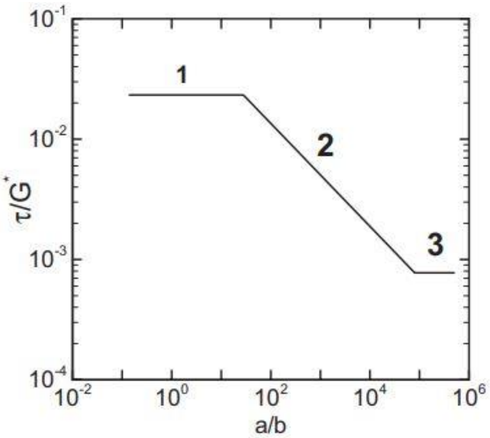
به‌طوری که:

$$M = \frac{\log\left(\frac{\bar{\tau}_{f_1}}{\bar{\tau}_{f_2}}\right)}{\log\left(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}\right)} \tag{۵}$$

$$B = \frac{\log(\bar{\tau}_{f_1})\log(\bar{a}_2) - \log(\bar{\tau}_{f_2})\log(\bar{a}_1)}{\log\left(\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}_1}\right)} \tag{۶}$$

$\bar{\tau}_{f_1}$ و $\bar{\tau}_{f_2}$ تنش اصـــطکاکی بی‌بعد در نواحی ۱ و ۲ اســـت. همچنین M، شـیب خط ناحیه گذر ۲ و B، عرض از مبدأ خط ناحیه گذر ۲ می‌با شد. با ا ستفاده از این معادلات می‌توان نیروی اصطکاک را به‌صورت معادله (۷) به دست آورد:

$$\frac{F_f}{G^* b^2} = \begin{Bmatrix} \bar{\tau}_{f_1}, & \bar{a} < \bar{a}_1 \\ 10^B a^{-M+2}, & \bar{a}_1 < \bar{a} < \bar{a}_2 \\ \bar{\tau}_{f_2}, & \bar{a} > \bar{a}_2 \end{Bmatrix} \tag{۷}$$



شکل ۲ رابطه تنش اصطکاک بدون بعد و شعاع تماس بدون بعد در مدل اصطکاکی HK [16]

مقادیر اولیه مسئله

در پژوهش حاضر توسعه مدل ریاضی با در نظر گرفتن خواص مکانیکی مطابق جدول (۱) انجام شده است. در این شبیه‌سازی، یک‌ذره طلا به شـــعاع (Rp) ۵۰ نانومتر، بر روی بســـتر اکســـید سیلیکون که با سرعت ثابت حرکت می‌کند، رانده شده ا ست. محدوده خواص هندسـی میکروسـکوپ نیروی اتمی در جدول (۲) و محدوده پارامترهای محیطی در جدول (۳) نشان داده‌شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی میکروسکوپ نیروی اتمی

چگالی (kg/m^3)	مدول برشی (GPa)	ضریب پواسن	مدول یانگ (GPa)
۲۳۳۰	۴۰/۵	۰/۲۷	۱۶۹

جدول ۲ محدوده خواص هندسی میکروسکوپ نیروی اتمی

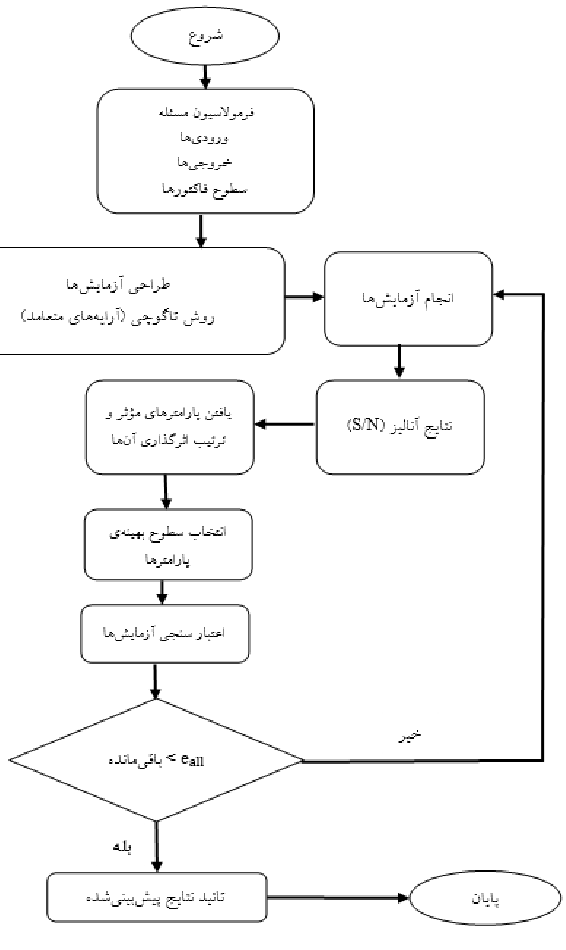
طول (µm)	عرض (µm)	ضخامت (µm)	ارتفاع (µm)
۲۲۵	۴۸	۱	۱۲

جدول ۳ محدوده پارامترهای محیطی

سرعت (mm/s)	مدول یانگ (GPa)	چسبندگی (J/m2)
۱۰۰	۸۵/۵	۰/۲

طراحی آزمایش به روش تاگوچی

طراحی آزمایش‌ها به‌منظور دستیابی به بهینه‌ترین تعداد آزمایش، با هدف صرفه‌جویی در هزینه و وقت انجام می‌شوند. از روش‌های طراحی آزمایش می‌توان به روش تاگوچی و روش سطح پاسخ، اشاره کرد. روش تاگوچی، شامل طراحی سیستم و طراحی پارامتر، برای دستیابی به یک فرایند قوی و بهترین کیفیت محصول است. هدف از روش طراحی سیستم، تعیین سطوح مناسب برای عوامل طراحی است. طراحی سطوح پارامترها تعیین می‌کند که بهترین عملکرد محصول یا فرایند مورد مطالعه ایجاد شود. روش تاگوچی از یک تابع ضرر برای محاسبه انحراف بین مقدار آزمایشی و مقدار مورد نظر استفاده می‌کند سپس نسبت سیگنال به نویز از تابع تلفات به دست می‌آید. در این روش می‌تواند با استفاده از یک تابع زیان، اثربخشی فرایند را به‌طور مؤثر بهبود بخشد و به فرایندی با کیفیت بالا از نظر طراحی پارامتر دست یابد [18]. علاوه بر این، از تحلیل واریانس (ANOVA) برای تخمین خطای واریانس و تعیین پارامترهای معنی‌دار استفاده می‌شود. مراحل انجام طراحی آزمایش‌ها و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ الگوریتم کلی طراحی آزمایش و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

جدول ۴ سطوح متغیرهای در نظر گرفته شده برای آزمایش

نوع متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
$\bar{\tau}_{f_1}$	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۳۲۵	۰/۰۲۷۹
$\bar{\tau}_{f_2}$	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۹۳
B	−۲/۸۰۴	−۲/۳۳۷	−۱/۸۶۹
M	−۰/۵۱۲۸	−۰/۴۲۷۴	−۰/۳۴۱۹

جدول ۵ طراحی آزمایش به روش تاگوچی

شماره آزمایش	$\bar{\tau}_{f_1}$	$\bar{\tau}_{f_2}$	B	M
۱	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۲	−۱/۸۶۹	−۰/۳۴۱
۲	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۲	−۱/۸۶۹	−۰/۳۴۱
۳	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۶۲	−۱/۸۶۹	−۰/۳۴۱
۴	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۷۷۵	−۲/۳۳۷	−۰/۴۲۷
۵	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۷۷۵	−۲/۳۳۷	−۰/۴۲۷
۶	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۷۷۵	−۲/۳۳۷	−۰/۴۲۷
۷	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۹۳	−۲/۸۰۴	−۰/۵۱۲
۸	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۹۳	−۲/۸۰۴	−۰/۵۱۲
۹	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۰۹۳	−۲/۸۰۴	−۰/۵۱۲
۱۰	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۶۲	−۲/۳۳۷	−۰/۵۱۲
۱۱	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۶۲	−۲/۳۳۷	−۰/۵۱۲
۱۲	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۶۲	−۲/۳۳۷	−۰/۵۱۲
۱۳	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۷۷۵	−۲/۸۰۴	−۰/۳۴۱
۱۴	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۷۷۵	−۲/۸۰۴	−۰/۳۴۱
۱۵	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۷۷۵	−۲/۸۰۴	−۰/۳۴۱
۱۶	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۹۳	−۱/۸۶۹	−۰/۴۲۷
۱۷	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۹۳	−۱/۸۶۹	−۰/۴۲۷
۱۸	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۰۹۳	−۱/۸۶۹	−۰/۴۲۷
۱۹	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۶۲	−۲/۸۰۴	−۰/۴۲۷
۲۰	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۶۲	−۲/۸۰۴	−۰/۴۲۷
۲۱	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۶۲	−۲/۸۰۴	−۰/۴۲۷
۲۲	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۷۷۵	−۱/۸۶۹	−۰/۵۱۲
۲۳	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۷۷۵	−۱/۸۶۹	−۰/۵۱۲
۲۴	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۷۷۵	−۱/۸۶۹	−۰/۵۱۲
۲۵	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۹۳	−۲/۳۳۷	−۰/۳۴۱
۲۶	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۹۳	−۲/۳۳۷	−۰/۳۴۱
۲۷	۰/۰۲۷۹	۰/۰۰۰۹۳	−۲/۳۳۷	−۰/۳۴۱

در این پژوهش به‌منظور بهینه‌سازی تعداد آزمایش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار مینی تب نسخه ۲۱٫۱ به طراحی آزمایش به روش تاگوچی و بهینه‌سازی پارامترهای ورودی در مدل اچ‌کا به‌منظور جابه‌جایی نانوذره طلا پرداخته شده است. در این پژوهش چهار پارامتر فرایند که هر کدام دارای سه سطح هستند و برخی از تعاملات بین پارامترهای فرایند بررسی‌شده است. چهار پارامتر فرایند و سطوح عامل آن‌ها در جدول (۴) خلاصه شده است. پاسخ‌های خروجی، نیروی بحرانی و زمان بحرانی می‌باشند. همچنین در ادامه جدول (۵)، جدول طراحی آزمایش به روش تاگوچی با طرح متعامد ۲۷ تایی (L27) را نشان می‌دهد.

تحلیل نتایج

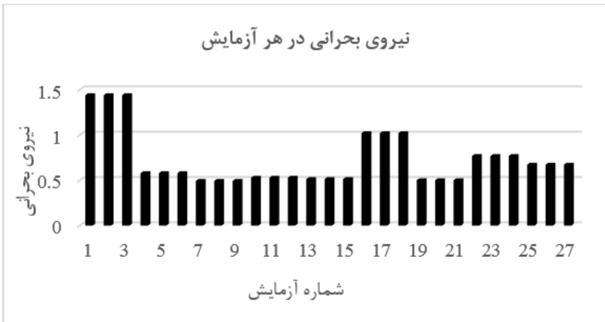
در طراحی آزمایش با روش تاگوچی، می‌توان تأثیر پارامترها با سطوح مختلف را بر روی پاسخ خروجی بررسی کرد. روش تاگوچی، روشی مناسب جهت رسیدن به مقدار بهینه سطوح پارامترها است. برای انجام تجزیه‌وتحلیل جهت تشخیص پارامترهای تأثیرگذار و مقادیر بهینه سطوح از دو روش آنالیز واریانس و نسبت سیگنال به نویز می‌توان استفاده کرد [19]. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در این پژوهش با روش سیگنال به نویز انجام‌شده است؛ در این بخش ابتدا به محاسبه میزان نیرو و زمان بحرانی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا پرداخته شده، همچنین در ادامه به تجزیه‌وتحلیل نسبت سیگنال به نویز، آنالیز واریانس و مدل رگرسیون پرداخته خواهد شد.

محاسبه نیرو و زمان بحرانی با مدل اصطکاکی اچ‌کا

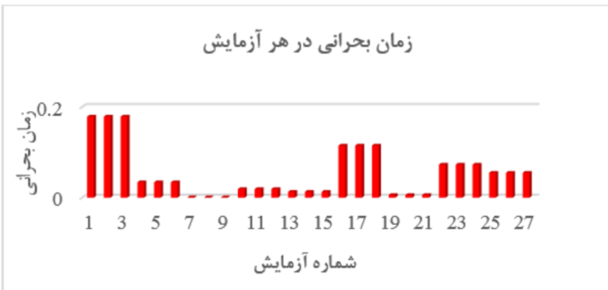
همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد؛ در این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی اچ‌کا بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا پرداخته‌شده است. بدین منظور پس از انجام طراحی آزمایش‌های صورت گرفته با نرم‌افزار مینی تب، به‌منظور محاسبه میزان نیرو و زمان بحرانی برای هر آزمایش از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. همچنین تأثیر هر کدام از متغیرهای $\bar{\tau}_{f_1}$، $\bar{\tau}_{f_2}$، B و M در مدل اچ‌کا مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۶) و شکل‌های (۴–الف) و (۴–ب) به‌ترتیب مقدار نیرو و زمان بحرانی در هرکدام از آزمایش‌ها آورده شده است.

جدول ۶ نیرو و زمان بحرانی در هر آزمایش

نیروی بحرانی	زمان بحرانی	شماره آزمایش	نیروی بحرانی	زمان بحرانی	شماره آزمایش
۰/۰۱۳	۰/۵۱۴	۱۵	۱/۴۴۴	۰/۱۷۹	۱
۰/۱۱۵	۱/۰۲	۱۶	۱/۴۴۴	۰/۱۷۹	۲
۰/۱۱۵	۱/۰۲	۱۷	۱/۴۴۴	۰/۱۷۹	۳
۰/۱۱۵	۱/۰۲	۱۸	۰/۵۷۹	۰/۰۳۴	۴
۰/۰۰۶	۰/۵	۱۹	۰/۵۷۹	۰/۰۳۴	۵
۰/۰۰۶	۰/۵	۲۰	۰/۵۷۹	۰/۰۳۴	۶
۰/۰۰۶	۰/۵	۲۱	۰/۴۹۴	۰/۰۰۱	۷
۰/۰۷۳	۰/۷۶۸	۲۲	۰/۴۹۴	۰/۰۰۱	۸
۰/۰۷۳	۰/۷۶۸	۲۳	۰/۴۹۴	۰/۰۰۱	۹
۰/۰۷۳	۰/۷۶۸	۲۴	۰/۵۲۹	۰/۰۱۹	۱۰
۰/۰۵۵	۰/۶۷۳	۲۵	۰/۵۲۹	۰/۰۱۹	۱۱
۰/۰۵۵	۰/۶۷۳	۲۶	۰/۵۲۹	۰/۰۱۹	۱۲
۰/۰۵۵	۰/۶۷۳	۲۷	۰/۵۱۴	۰/۰۱۳	۱۳
			۰/۵۱۴	۰/۰۱۳	۱۴



(الف)



(ب)

شکل ۴ مقدار نیرو و زمان بحرانی در هر آزمایش

نسبت سیگنال به نویز (S/N)

در روش تاگوچی به‌منظور تعیین سطوح آزمایش‌ها با فرض بالاترین یا پایین‌ترین عملکرد برای متغیرهای آزمایش از نسبت سیگنال به نویز استفاده می‌شود. نسبت سیگنال به نویز جهت به دست آوردن سطوح بهینه برای هر پارامتر ورودی از یک تابع زیان به دست می‌آید؛ بنابراین تابع زیان برای نیروی بحرانی از نوع هر چه کمتر بهتر انتخاب شده و به‌عنوان تبدیل لگاریتمی تابع زیان مطابق معادله (۸) محاسبه می‌شود [20]:

$$\eta_{ij} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (۸)$$

تابع زیان برای زمان بحرانی از نوع هر چه بیشتر بهتر انتخاب شده و به‌عنوان تبدیل لگاریتمی تابع زیان مطابق معادله (۹) محاسبه می‌شود [20]:

$$\eta_{ij} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (۹)$$

که در این دو معادله (۸) و (۹)، y_i^2 از نتایج به‌دست آمده و n تعداد آزمایش‌ها می‌باشد.

نسبت سیگنال به نویز برای سطوح پارامترهای مختلف برای نیرو و زمان بحرانی به‌ترتیب در جدول‌های (۷) و (۸) آورده شده است. مطابق جدول (۷) مشاهده می‌شود که سطوح پارامتر با پایین‌ترین نسبت سیگنال به نویز برای پارامترهای $\bar{\tau}_{f_1}$ و $\bar{\tau}_{f_2}$ در سطح ۱ می‌باشد. همچنین برای پارامترهای B و M در سطح ۳ می‌باشد؛ بنابراین سطوح پارامترهای توصیه‌شده به‌منظور کاهش نیروی بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا، تنش اصطکاکی بی‌بعد در نواحی ۱ و ۲ ($\bar{\tau}_{f_1}$ و $\bar{\tau}_{f_2}$) به ترتیب با مقادیر ۰/۰۱۸۶ و ۰/۰۰۰۶۲ همچنین عرض از مبدأ خط ناحیه ۲ و شیب‌خط در این ناحیه (B و M) به ترتیب با مقادیر ۱/۸۶۹- و ۰/۳۴۱۹- می‌باشند. مقدار دلتا تفاوت بین کمترین و بالاترین مقدار نسبت سیگنال به نویز را در هر پارامتر نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر دلتا، پارامترها رتبه‌بندی می‌شوند. این امر به ما کمک می‌کند تا تأثیرگذارترین پارامتر را انتخاب کنیم. مشاهده می‌شود که پارامتر B (عرض از مبدأ خط ناحیه ۲) با مقدار رتبه ۱ را به خود اختصاص داده است. همچنین دومین عامل اثرگذار، پارامتر M (شیب‌خط) می‌باشد و به دنبال آن پارامتر $\bar{\tau}_{f_2}$ و $\bar{\tau}_{f_1}$ عوامل اثرگذار بر کاهش نیروی بحرانی می‌باشند.

مطابق جدول (۸) مشاهده می‌شود که سطوح پارامتر با بالاترین نسبت سیگنال به نویز برای پارامترهای $\bar{\tau}_{f_1}$ و $\bar{\tau}_{f_2}$ در سطح ۲ می‌باشد. همچنین برای پارامترهای B و M نیز در سطح ۳ می‌باشد؛ بنابراین سطوح پارامترهای توصیه شده به‌منظور افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذرات، تنش اصطکاکی

بی‌بعد در نواحی ۱ و ۲ ($\bar{\tau}_{f_1}$ و $\bar{\tau}_{f_2}$) به ترتیب با مقادیر ۰/۰۲۳۲۵ و ۰/۰۰۰۷۷ همچنین عرض از مبدأ خط ناحیه ۲ و شیب‌خط در این ناحیه (B و M) به ترتیب با مقادیر ۱/۸۶۹– و ۰/۳۴۱۹– می‌باشند. مطابق مقادیر دلتا، مشاهده می‌شود که اولین پارامتر مؤثر برافزایش زمان بحرانی، پارامتر B (عرض از مبدأ خط ناحیه ۲) می‌باشد و به ترتیب پارامترهای M، $\bar{\tau}_{f_2}$ و $\bar{\tau}_{f_1}$ عوامل اثرگذار بعدی می‌باشند.

جدول ۷ نسبت سیگنال به نویز برای نیروی بحرانی

سطح	$\bar{\tau}_{f_1}$	$\bar{\tau}_{f_2}$	B	M
۱	۲/۵۵۴۷	۲/۷۷۹۲	۵/۹۶۶۲	۴/۶۴۵۱
۲	۳/۷۰۸۰	۴/۲۶۹۸	۴/۵۷۰۲	۳/۵۲۱۴
۳	۳/۹۱۱۰	۳/۱۲۴۸	۰/۳۶۲۶–	۲/۰۰۷۳
دلتا	۱/۳۵۶۳	۱/۴۹۰۶	۶/۳۲۸۸	۲/۶۳۷۸
رتبه	۴	۳	۱	۲

جدول ۸ نسبت سیگنال به نویز برای زمان بحرانی

سطح	$\bar{\tau}_{f_1}$	$\bar{\tau}_{f_2}$	B	M
۱	۳۴/۷۷–	۳۱/۲۷–	۴۷/۳۹–	۳۹/۰۵–
۲	۳۰/۳۱–	۲۹/۹۴–	۲۹/۶۶–	۳۰/۸۶–
۳	۳۰/۷۹–	۳۴/۶۶–	۱۸/۸۲–	۲۵/۹۵–
دلتا	۴/۴۶	۴/۷۲	۲۸/۵۷	۱۳/۱۰
رتبه	۴	۳	۱	۲

بررسی تأثیر پارامترهای ورودی بر روی نیرو و زمان بحرانی با استفاده از نمودار سیگنال به نویز

در این بخش تأثیر پارامترهای ورودی $\bar{\tau}_{f_1}$، $\bar{\tau}_{f_2}$، B و M در مدل اچ‌کا بر روی مشخصه‌های خروجی نیرو و زمان بحرانی به‌طور کامل با استفاده از نمودار سیگنال به نویز در آزمایش تاگوچی مورد بررسی قرار گرفته است.

نمودار شکل (۵–الف) که نشان دهنده نیروی بحرانی در هر یک از سطوح پارامترها است، نیز نشان دهنده مشابه بودن مقادیر نیروی بحرانی در سطوح پارامترهای عرض از مبدأ خط ناحیه ۲ و شیب‌خط (B و M) است. همان‌طور که از شکل (۵–الف) مشاهده می‌شود، با افزایش پارامتر $\bar{\tau}_{f_1}$، نیروی بحرانی افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار مشخص است؛ که سطح ۱ برای پارامتر $\bar{\tau}_{f_1}$ سبب کمینه شدن نیروی بحرانی می‌شود. بیان این نکته ضروری است که به‌طور کلی همان‌طور که در تحلیل نمودار مشخص است، تغییرات پارامتر $\bar{\tau}_{f_1}$ اثر قابل توجهی بر روی نیروی بحرانی ندارد.

پارامتر ارزیابی‌شده بعدی، $\bar{\tau}_{f_2}$می‌باشد. همان‌طور که از نمودار شکل (۵–الف) م شاهده می شود، افزایش این پارامتر از سطح اول تا دوم موجب افزایش زمان بحرانی می شود، در حالی که از سطح دوم تا سوم میزان نیروی بحرانی را کاهش می‌دهد. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی سطوح پارامترهای مدل اصطکاکی اچ‌کا به‌منظور کاهش نیروی بحرانی می‌باشد پس با توجه به توضیح داده شده، برای پارامتر $\bar{\tau}_{f_2}$، سطح ۱ بهینه‌ترین حالت است زیرا موجب کاهش نیروی بحرانی می‌شود. همان‌طور که در تحلیل نمودار مشخص است، تغییرات پارامتر $\bar{\tau}_{f_2}$ اثر ناچیزی بر روی نیروی بحرانی دارد و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

یکی از پارامترهای مؤثر بر کاهش نیروی بحرانی در مدل اچ‌کا برای جابه‌جایی نانوذرات، پارامتر B می‌باشد. با توجه به شکل (۵–الف)، سطح ۳ و بعد از آن سطح ۲ بیشترین تأثیر را بر کاهش نیروی بحرانی دا شته‌اند. همچنین م شاهده می شود که با افزایش م قدار پارامتر B، نیروی بحرانی به‌طور قا بل توجهی کاهش می‌یابد. با توجه به شیب کاهش و سطوح مورد نظر مشاهده می‌شود که مقدار این پارامتر در سطح ۳ مؤثرترین عامل بر کاهش نیروی بحرانی می‌باشد.

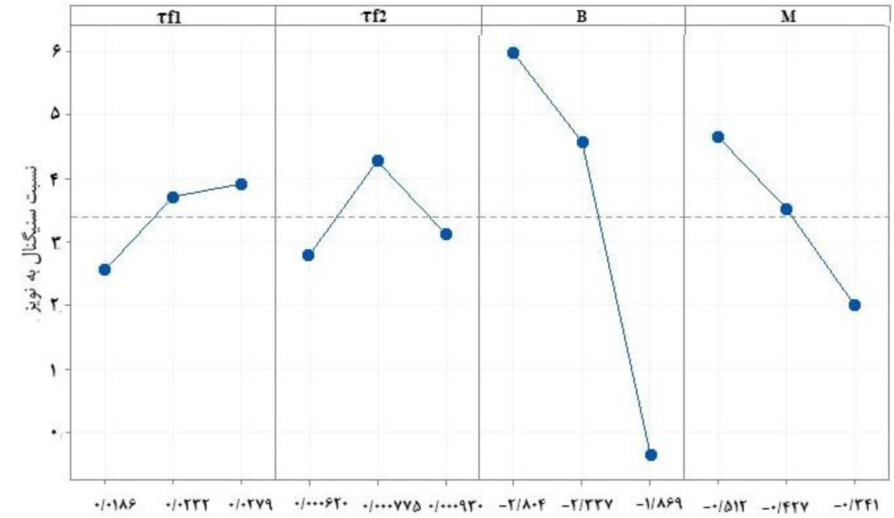
پارامتر بعدی که تأثیر آن بر کاهش نیروی بحرانی برر سی شده ا ست، پارامتر M می‌با شد. همان‌طور که از نمودار شکل (۵–الف) پیدا ست، افزایش مقدار پارامتر M از سطح ۱ تا سطح ۳ موجب کاهش نیروی بحرانی می‌شود. با توجه به نمودار مشخص است که مقدار این پارامتر در سطح ۳ مؤثرترین عا مل بر کاهش نیروی بحرانی می باشد. همچنین تأثیر این پارامتر از پارامتر B کم‌تر ا ست و به‌عنوان دومین پارامتر اثرگذار بر کاهش نیروی بحرانی شناخته شده است.

نمودار شکل (۵–ب) ن شان دهنده میانگین زمان بحرانی در هر یک از سطوح پارامترها می‌باشد. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی سطوح پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی اچ‌کا به‌منظور افزایش ز مان بحرانی ج هت جا به جایی نانوذرات می‌باشد. مطابق شکل (۵–ب) مشاهده می‌شود که افزایش پارامتر $\bar{\tau}_{f_1}$ از سطح ۱ تا سطح ۲ موجب افزایش زمان بحرانی می شود، در حالی که از سطح ۲ تا سطح ۳ مقدار زمان بحرانی روند کاه شی را با شیب ملایمی طی می‌کند. با توجه به نمودار

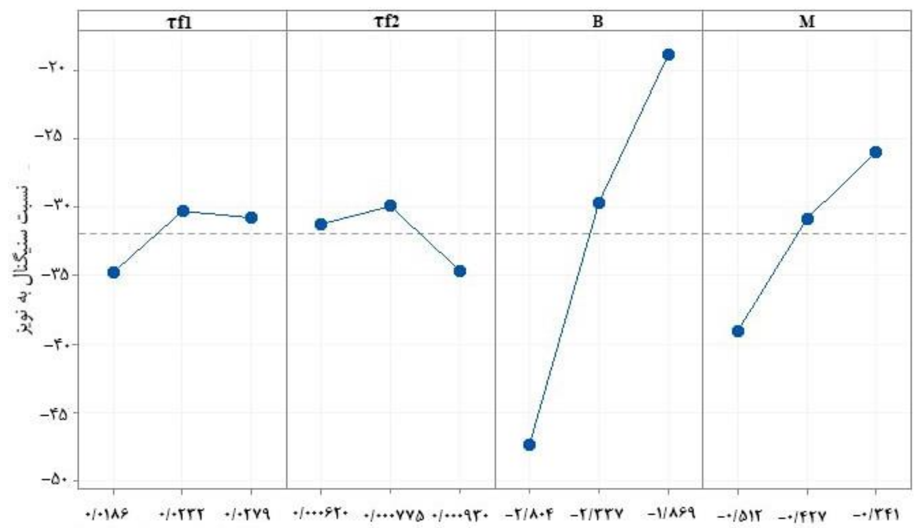
مشخص است؛ که سطح ۲ برای پارامتر $\bar{\tau}_{f_1}$ سبب بیشینه شدن زمان بحرانی می شود؛ اما این تغییرات زمان چشم‌گیر نیست و می‌توان $\bar{\tau}_{f_1}$ را به‌عنوان پارامتر غیرضروری در نظر گرفت.

در اثر افزایش پارامتر $\bar{\tau}_{f_2}$ از سطح ۱ تا سطح ۲، مقدار زمان بحرانی با شیب کمی افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش مقدار از سطح ۲ تا سطح ۳ موجب کاهش زمان بحرانی می‌شود؛ بنابراین با توجه به نمودار حاصل می شود که سطح ۲ برای پارامتر $\bar{\tau}_{f_2}$، بهینه‌ترین سطح است و موجب بیشینه شدن زمان بحرانی می‌شود. تأثیر این پارامتر بر نیروی بحرانی ناچیز است.

یکی از پارامترهای مؤثر بر افزایش زمان بحرانی در مدل اچکا برای جابه‌جایی نانوذرات، پارامتر B می‌باشد. مطابق شکل (۵-ب) سطح ۳ و بعد از آن سطح ۲ بیشترین تأثیر را بر افزایش زمان بحرانی داشته‌اند. افزایش مقدار پارامتر B سبب افزایش چشم‌گیر زمان بحرانی می‌شود. با توجه به شیب نمودار و سطوح موجود نتیجه‌گیری می‌شود که مقدار این پارامتر در سطح ۳ مؤثرترین عامل بر روی زمان بحرانی می‌باشد. پارامتر بعدی که تأثیر آن بر افزایش زمان بحرانی بررسی شده است، پارامتر M می‌باشد. مطابق شکل (۵-ب)، افزایش مقدار پارامتر M موجب افزایش زمان بحرانی می شود. مشخص است که مقدار این پارامتر در سطح ۳ مؤثرترین عامل بر روی زمان بحرانی می‌باشد.



(الف) نیروی بحرانی



(ب) زمان بحرانی

شکل ۵ نمودار تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر روی نیرو و زمان بحرانی

نتیجه‌گیری

استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی در نانوتکنولوژی نه‌تنها به‌عنوان ابزاری برای تصویربرداری و آنالیز توپوگرافی سطوح، بلکه به‌عنوان یک جابه‌جا کننده در تحقیقات مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در گذار از دنیای ماکرو به دنیای میکرو/نانو، نیروهای سطحی مانند اصطکاک و چسبندگی که قبلا اهمیت کمتری داشتند یا حتی ناچیز بودند، تحت نظارت جدی قرار دارند. در این راستا، مدل‌های اصطکاک مختلفی توسط محققان متعدد به‌منظور مدل‌سازی شرایط حاکم در جابه‌جایی میکرو/نانو ایجادشده‌اند. در این پژوهش جابه‌جایی نانوذره طلا مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی با استفاده از مدل اصطکاکی اچ‌کا که بر اساس سطح تماس واقعی است، مورد بررسی قرار گرفته شده است. به‌منظور جابه‌جایی، یک‌ذره طلا به شعاع (Rp) ۵۰ نانومتر، بر روی بستر اکسید سیلیکون که با سرعت ثابت حرکت می‌کند، رانده‌شده است. هدف اصلی از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای ورودی مدل اصطکاکی اچ‌کا بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی در جابه‌جایی نانوذره طلا می‌باشد. پارامترهای $\bar{\tau}_{f_1}$، $\bar{\tau}_{f_2}$، B و M از جمله پارامترهای ورودی تحت بررسی در این پژوهش بودند. بدین منظور جهت دستیابی به سطوح بهینه برای هر یک از پارامترهای ورودی برای مدل اصطکاکی اچ‌کا از روش طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شد و به‌منظور تجزیه‌وتحلیل نتایج، روش سیگنال به نویز به کار گرفته شد. با توجه به نتایج حاصل‌شده از تجزیه‌وتحلیل سیگنال به نویز اثرات هر ۴ پارامتر ورودی مدل اچ‌کا بر کاهش نیروی بحرانی و افزایش زمان بحرانی بررسی شد. طبق بررسی‌های صورت گرفته، برای نیروی بحرانی نتایج زیر مشاهده شد:

اولین پارامتر مؤثر بر کاهش نیروی بحرانی، پارامتر B می‌باشد. سطح ۳ با مقدار ۱/۸۶۹– و بعد از آن سطح ۲ با مقدار ۲/۳۳۷–بیشترین تأثیر را بر کاهش نیروی بحرانی داشته‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار پارامتر B از سطح ۱ با مقدار ۲/۸۰۴– تا سطح ۳ با مقدار ۱/۸۶۹– نیروی بحرانی به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. با توجه به شیب کاهش و سطوح مورد نظر مشاهده می‌شود که پارامتر B در سطح ۳ و با مقدار ۱/۸۶۹–، مؤثرترین عامل بر کاهش نیروی بحرانی می‌باشد.

دومین پارامتر مؤثر بر کاهش نیروی بحرانی، M می‌باشـــد. افزایش مقدار پارامتر M از سطح ۱ با مقدار ۰/۵۱۲– تا سطح ۳ با مقدار ۰/۳۴۱– موجب کاهش نیروی بحرانی می‌شود. همچنین مشخص شد که مقدار این پارامتر در سطح ۳ و با مقدار ۰/۳۴۱– مؤثرترین عامل بر کاهش نیروی بحرانی می‌باشد.

نتایج حاصـــل برای تأثیر پارامترهای ورودی برافزایش زمان بحرانی نیز به شرح زیر می‌باشد:

پارامتر B مؤثرترین پارامتر ورودی در مدل اصطکاکی اچ‌کا بر افزایش زمان بحرانی می‌باشد. سطح ۳ با مقدار عددی ۱/۸۶۹– و بعد از آن سطح ۲ با مقدار عددی ۲/۳۳۷– بیشترین تأثیر را بر افزایش زمان بحرانی داشته‌اند. افزایش مقدار پارامتر B سبب افزایش چشم‌گیر زمان بحرانی می‌شود. با توجه به شیب نمودار و سطوح موجود نتیجه‌گیری می‌شود که مقدار این پارامتر در سطح ۳ و با مقدار ۱/۸۶۹–، مؤثرترین عامل بر روی زمان بحرانی می‌باشد. دومین پارامتر مؤثر برافزایش زمان بحرانی پارامتر M در سطح ۳ و با مقدار عددی ۰/۳۴۱– می‌باشد.

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	مساحت واقعی تماس
A	شعاع تماس
$\bar{a}$	شعاع تماس بی‌بعد
B	عرض از مبدأ خط گذر ناحیه ۲
E	مدول یانگ
E^*	مدول یانگ مؤثر
f_0	نیروی چسبندگی
f_N	نیروی عمودی سطح
G^*	مدول برشی مؤثر
G_1	مدول برشی سوزن
G_2	مدول برشی ذره
H	ارتفاع سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی
L	طول تیرک
M	شیب خط گذر ناحیه ۲
t	ضخامت تیرک
W	عرض تیرک

علائم یونانی

τ_f	تنش اصطکاکی

$\bar{\tau}_{f_1}$	تنش اصطکاکی بی‌بعد در ناحیه ۱
$\bar{\tau}_{f_2}$	تنش اصطکاکی بی‌بعد در ناحیه ۲

واژه نامه

Atomic force microscopy	میکروسکوپ نیروی اتمی
Dawson	داوسون
Gold nanoparticles	نانوذره‌ی طلا
Hertz	هرتز
HK friction model	مدل اصطکاکی اچ‌کا
Hoeprich	هوپریچ
Lundberg	لوندبرگ
Nikpour	نیکپور
nanomanipulation	جابه‌جایی نانوذرات

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] M. Zakeri, and M. Kharazmi, “Modeling of Friction in Micro/Nano scale with Random Roughness Distribution,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 11, 2015. (In Persian)

[2] M. Korayem, and H. Khaksar, “Choosing Nano medicine Stiffness using contact models, based on the atomic force microscopy with Analysis of the cancer cell elasticity modulus,” *Research square*, 2022.

[3] M. Korayem, and H. Khaksar, “Nanomanipulation of elliptic and cubic nanoparticles with consideration of the impact theories,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 90,pp. 101-113, 2021.

[4] M. Korayem, H. Khaksar, and M. Taheri, “Simulating the impact between particles with applications in nanotechnology fields (identification of properties and manipulation),” *International Nano Letters*, vol. 4, no. 4, pp. 121-127, 2014.

[5] S. Vlassov, B. Polyakov, L.M. Dorogin, A. Lõhmus, A. Romanov, I. Kink, E. Gnecco, and R. Lõhmus, “Real-time manipulation of gold nanoparticles inside a scanning electron microscope,” *Solid State Communications*, vol. 151, no. 9, pp. 688-692, 2011.

[6] M. Moreno-Moreno, P. Ares, C. Moreno, F. Zamora, C. Gomez-Navarro, and J. Gomez-Herrero, “AFM manipulation of gold nanowires to build electrical circuits”, *Nano Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 5459-5468, 2019.

[7] S. Bathaee, “Sensitivity analysis of peripheral parameters in three dimentional nano-manipulation by using HK model,” *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 9, no. 2, pp. 123-139, 2019. (In Persian)

[8] M. Taheri, “Application of atomic force microscopy in critical force and critical time extraction of 2D manipulation for gastric cancer tissue with different friction models,” *Nanoscale*, vol. 9, no. 1, pp. 136-145, (2022). (In Persian)

[9] S. Mohammadi, M. Moghadam, and H. Pishkenari, “Dynamical modeling of manipulation process in trolling-mode AFM,” *Physical Review E*, vol. 197, pp. 83-94, 2019.

[10] M. Taheri, “3D Modeling of Gold Nanoparticle Manipulation in Air Using HK Friction Model,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 10, pp. 275-282, 2017. (In Persian)

[11] M. Habibnejad Korayem, H. Badkoobehhezaveh, and M. Taheri, “Experimental Determination of HT29 Cancerous Cell Surface Roughness by Atomic Force Microscopy to be Applied in Nanomanipulation,” Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics, vol. 28, no. 1, pp. 111-122, 2017. (In Persian)

[12] H. Esfahani, V. Azimirad, and M. Zakeri, “Sliding Mode-PID Fuzzy controller with a new reaching mode for underwater robotic manipulators,” *Latin American Applied Research*, vol. 44, no. 3, pp. 253-258, 2014.

[13] M. Zakeri, and J. Faraji, “Dynamic modeling of nano/microparticles displacement in multi-point contact based on the Rumpf model,” *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 120-130, 2016. (In Persian)

[14] P. Heidari, M. Salehi, B. Ruhani, V. Purcar, and S. Căprărescu, “Influence of Thin Film Deposition on AFM Cantilever Tips in Adhesion and Young’s Modulus of MEMS Surfaces,” *Materials*, vol. 15, no. 6, pp. 2102, 2022.

[15] G. Adams, S. Müftü, and N. Azhar, “A scale-dependent model for multi-asperity contact and friction,” *Journal of Tribology*, vol. 125, no. 4, pp. 700-708, 2003.

[16] G. Adams, and S. Müftü, “Improvements to a scale-dependent model for contact and friction,” *Applied Physics*, vol. 38, no. 9, pp. 1402, 2005.

[17] J. Hurtado, and K. Kim, “Scale effects in friction of single–asperity contacts. I. From concurrent slip to single–dislocation–assisted slip,” *Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. *455*, no. 1989, pp. 3363-3384, 1999.

[18] T. Hou, C. Su, and W. Liu, “Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the Taguchi method, response surface method and genetic algorithm,” *Powder Technology*, vol. *173*, no. 3, pp. 153-162, 2007.

[19] J. Wang, and W. Wan, “Experimental design methods for fermentative hydrogen production: a review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 235-244, 2009.

[20] S. Boopathi, K. Sivakumar, and R. Kalidas, “Parametric study of dry WEDM using Taguchi method,” *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 2, no. 4, pp. 63-68, 2012.